文章编号:1673-5005(2018)05-0065-10 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2018.05.007

金属套管对多分量井间电磁响应的影响

魏宝君[1], 李晓强[2], 任广强[1], 贾毅龙[1], 吴康康[1], 党 峰[3], 刘福平[4]

(1. 中国石油大学(华东)理学院,山东青岛 266580; 2. 中国石油集团测井有限公司吐哈分公司,新疆鄯善 838200; 3. 中国石油集团测井有限公司,陕西西安 710077;4. 北京印刷学院,北京 102600)

摘要:采用柱状成层各向异性介质中并矢 Green 函数的解析式模拟当发射井含金属套管时多分量井间电磁场的响应,并系统分析金属套管对井间电磁信号不同分量的影响规律。计算结果表明,金属套管的存在导致井间电磁信号所有分量的幅度衰减和相位延迟。在固定套管参数和发射频率的前提下,不同分量的幅度衰减与相位延迟分别具有相同的数值且保持恒定,与线圈系位置和地层电导率无关。频率越高,套管厚度越大,套管磁导率和电导率越大,金属套管导致的幅度衰减和相位延迟越明显。针对发射井、接收井单井或均含有金属套管的情况,在对井间电磁测量数据进行反演时采用该解析方法即可事先消除金属套管的影响。

关键词:井间电磁响应; 金属套管; 多分量; 并矢 Green 函数

中图分类号:P 631.9 **文献标志码**:A

引用格式:魏宝君,李晓强,任广强,等. 金属套管对多分量井间电磁响应的影响[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2018,42(5):65-74.

WEI Baojun, LI Xiaoqiang, REN Guangqiang, et al. Effects of metal casing on multi-component cross-hole electromagnetic responses [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2018,42(5):65-74.

Effects of metal casing on multi-component cross-hole electromagnetic responses

WEI Baojun[1], LI Xiaoqiang[2], REN Guangqiang[1], JIA Yilong[1], WU Kangkang[1], DANG Feng[3], LIU Fuping[4]

(1. *College of Science in China University of Petroleum(East China)*, *Qingdao* 266580, *China*;
2. *Tuha Branch*, *China Petroleum Logging Company Limited*, *Shanshan* 838200, *China*;
3. *China Petroleum Logging Company Limited*, *Xi'an* 710077, *China*;
4. *Beijing Institute of Graphic Communication*, *Beijing* 102600, *China*)

Abstract: The multi-component cross-hole electromagnetic field's responses were simulated using an analytical expression of dyadic Green's functions in cylindrically stratified anisotropic media. With the transmitter borehole encased with a metal casing, the effects of metal casing on different components of cross-hole electromagnetic signals were analyzed systematically. The results show that the existence of metal casing will lead to amplitude attenuation and phase delay for all components of cross-hole electromagnetic signals. Under the condition of fixed casing parameters and frequency, the amplitude attenuation and the phase delay variations remain constant for different components, the coil position and the formation's conductivity. The amplitude attenuation and phase delay caused by the metal casing become more obvious for higher frequency, larger casing thickness and larger casing permeability and conductivity. In the case that the transmitter borehole and/or the receiver borehole are encased with metal casing, the effects of metal casing can be corrected by this analytical method before inverting the cross-hole electromagnetic measurements.

收稿日期:2017-10-05

基金项目:国家科技重大专项(2017ZX05019-006);中央高校基本科研业务费专项(15CX05047A)

作者简介:魏宝君(1969-),男,教授,博士,教育部"新世纪优秀人才支持计划"入选者,研究方向为电磁测井理论及应用。E-mail: weibj@upc.edu.cn。

Keywords: cross-hole electromagnetic responses; metal casing; multi-component; dyadic Green's functions

在应用井间电磁探测技术时经常遇到发射井或接收井含有金属套管的情况[1],有时是双井同时含有金属套管,而传统的反演成像技术均基于无金属套管的地层环境[2-5],在对含金属套管影响的实测数据进行反演成像前需首先消除掉金属套管的影响,因而系统地研究金属套管对井间电磁场的影响规律并消除其影响很有必要。国内外已有大量文献对套管的影响规律进行了研究[6-15],但这些研究一般只讨论含金属套管发射井中轴向磁偶极子源在接收井中产生的轴向磁场受套管的影响规律(磁场的 zz 分量),且并未给出如何消除金属套管影响的方法,其中有些文献只讨论了对井间电磁信号幅度的影响规律。为了增加井间电磁测量的信息量,发射源和接收器均可以采用多分量的形式,因此也有必要系统分析金属套管对井间电磁信号不同分量的影响规律。笔者将所开发的柱状成层各向异性介质中的并矢 Green 函数[16-18]作为模拟发射井或接收井含金属套管时多分量井间电磁场响应的基本理论,系统分析金属套管对井间电磁信号各主分量的幅度和相位的影响规律,并给出针对所有分量井间电磁信号的幅度和相位测量数据消除金属套管影响的方法。

1 基本理论

采用文献[16]给出的柱状成层各向异性介质中的并矢 Green 函数作为数值模拟的基本理论。采用圆柱坐标系并假设场点的位置坐标为(ρ,φ,z)、源点的位置坐标为(ρ',φ',z')。对于柱状成层各向异性介质,设介质从最内层到最外层的编号依次为 $-m,-m+1,\cdots,0,1,\cdots,n$,每层介质的半径依次为 $\rho_{-m},\rho_{-m+1},\cdots,\rho_0,\rho_1,\cdots,\rho_{n-1}$,并假设源在第 0 层,则任意第 i 层介质中谱域并矢 Green 函数的 z 分量、φ 分量和 ρ 分量可分别表示为

$$\begin{pmatrix} g^E_{\nu z,i} \\ g^H_{\nu z,i} \end{pmatrix} = \begin{cases} [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{M}_{i\nu}+\boldsymbol{J}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}]\boldsymbol{b}_{i\nu}, & \rho\leqslant\rho', \\ [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}+\boldsymbol{J}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{N}_{i\nu}]\boldsymbol{a}_{i\nu}, & \rho>\rho', \end{cases} \tag{1}$$

$$\begin{pmatrix} g^E_{\nu\varphi,i} \\ g^H_{\nu\varphi,i} \end{pmatrix} = \begin{cases} [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{M}_{i\nu}+\boldsymbol{J}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}]\boldsymbol{b}_{i\nu}, & \rho\leqslant\rho', \\ [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}+\boldsymbol{J}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{N}_{i\nu}]\boldsymbol{a}_{i\nu}, & \rho>\rho', \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{pmatrix} g^E_{\nu\rho,i} \\ g^H_{\nu\rho,i} \end{pmatrix} = \begin{cases} [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{M}_{i\nu}+\boldsymbol{J}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}]\boldsymbol{b}_{i\nu}, & \rho\leqslant\rho', \\ [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}+\boldsymbol{J}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{N}_{i\nu}]\boldsymbol{a}_{i\nu}, & \rho>\rho'. \end{cases} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)$、$\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)$、$\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)$、$\boldsymbol{J}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)$、$\boldsymbol{J}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)$和$\boldsymbol{J}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)$均为 2×2 阶矩阵,其定义及表达式参见文献[16];$\boldsymbol{M}_{i\nu}$和 $\boldsymbol{N}_{i\nu}$分别为介质内层界面和外层界面的 2×2 阶广义反射矩阵,可由递推方法得到;$\boldsymbol{I}$ 为 2×2 阶单位矩阵;$\boldsymbol{a}_{i\nu}$和 $\boldsymbol{b}_{i\nu}$为二维列向量,其具体表达式取决于源的类型(单位电偶极子源或单位磁偶极子源)和方向(单位偶极矩是沿 z 向、φ 向还是 ρ 向放置),亦可根据边界条件由递推方法得到。利用式(1)~(3)并结合源的类型和方向,可得到柱状成层各向异性介质中谱域电流源和磁流源并矢 Green 函数的所有 9 个分量。

考虑到频率域电磁场均可表示为谱域电磁场积分的形式[19],即

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{E} \\ \boldsymbol{H} \end{pmatrix} = \int_{-\infty}^{+\infty} dk_z \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \exp[\mathrm{i}k_z(z-z')]\cdot \exp[\mathrm{i}\nu(\varphi-\varphi')]\cdot \begin{pmatrix} \boldsymbol{g}^E_\nu \\ \boldsymbol{g}^H_\nu \end{pmatrix}. \tag{4}$$

由式(1)~(3)并结合式(4),任意第 i 层介质中频率域内不同类型和方向的单位源产生的电磁场可表示为

$$\begin{pmatrix} E_{z,i} \\ H_{z,i} \end{pmatrix} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{d}k_z \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \exp[\mathrm{i}k_z(z-z')]\cdot \exp[\mathrm{i}\nu(\varphi-\varphi')]\cdot \begin{cases} [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{M}_{i\nu}+\boldsymbol{J}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}]\boldsymbol{b}_{i\nu}, & \rho\leqslant\rho', \\ [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}+\boldsymbol{J}_{\nu,z}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{N}_{i\nu}]\boldsymbol{a}_{i\nu}, & \rho>\rho', \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{pmatrix} E_{\varphi,i} \\ H_{\varphi,i} \end{pmatrix} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{d}k_z \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \exp[\mathrm{i}k_z(z-z')]\cdot \exp[\mathrm{i}\nu(\varphi-\varphi')]\cdot \begin{cases} [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{M}_{i\nu}+\boldsymbol{J}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}]\boldsymbol{b}_{i\nu}, & \rho\leqslant\rho', \\ [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}+\boldsymbol{J}_{\nu,\varphi}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{N}_{i\nu}]\boldsymbol{a}_{i\nu}, & \rho>\rho', \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{pmatrix} E_{\rho,i} \\ H_{\rho,i} \end{pmatrix} = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathrm{d}k_z \sum_{\nu=-\infty}^{\infty} \exp[\mathrm{i}k_z(z-z')]\cdot \exp[\mathrm{i}\nu(\varphi-\varphi')]\cdot \begin{cases} [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{M}_{i\nu}+\boldsymbol{J}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}]\boldsymbol{b}_{i\nu}, & \rho\leqslant\rho' \\ [\boldsymbol{H}^{(1)}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{I}+\boldsymbol{J}_{\nu,\rho}(k_{\rho,i}\rho)\boldsymbol{N}_{i\nu}]\boldsymbol{a}_{i\nu}, & \rho>\rho'. \end{cases} \tag{7}$$

利用式(5)~(7)可模拟发射井含金属套管时多分量井间电磁场的响应,所采用的地层模型见图 1。发射井为第 0 层介质,沿任意方向放置的单位磁偶极子源位于该层介质即钻井液中,发射井金属套管和套管外均质各向异性地层分别为第 1、2 层介

质。沿任意方向放置的接收器位于套管外的均质各向异性地层中,与发射源之间的径向和垂直距离均可改变。类似地,利用式(5)~(7)亦可模拟当接收井含金属套管时多分量井间电磁场的响应,此时需将套管外均质各向异性地层作为第 0 层介质,发射源在该层介质中,而接收井和其周围的套管分别为第-2、-1 层介质。根据互易原理,无论是发射井含有金属套管还是接收井含有金属套管,其影响是相同的,故只模拟图 1 所示的发射井含金属套管时的响应。对于发射井和接收井同时含有金属套管的情况,利用式(5)~(7)模拟后进行组合即可。

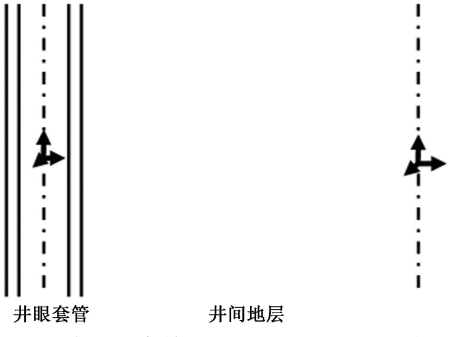

图 1　含金属套管多分量井间地层模型简图

Fig. 1　Schematic configuration of multi-component cross-hole formation model with metal casing

2　套管参数固定时井间电磁场主分量的响应

在模拟时固定金属套管的参数不变。设套管内半径为 10 cm、厚度为 1 cm,套管的电导率为 10^6 S/m 并且是非磁性的,套管内钻井液电导率为 0.1 S/m。发射源为单位磁偶极子源,其磁偶极矩为 1 A·m^2,计算时取频率分别为 10 和 200 Hz。分析分别改变接收器垂向位置、径向位置和均质地层电导率时井间电磁信号 3 个主分量的响应特点。

2.1　改变接收器垂向位置时的响应

假设井间距为 100 m,套管外均质各向异性地层的垂直电导率和水平电导率分别为 0.02 和 0.1 S/m。固定发射源在发射井的垂向坐标为 0 m,接收器沿接收井井轴方向的位置可连续改变,其垂向变化范围为-100~100 m。图 2 给出了频率为 10 Hz 时有套管和无套管情况下磁感应强度 3 个主分量($\rho\rho$、$\varphi\varphi$、zz)的幅度和相位随接收器垂向位置的变化关系,并给出了相同接收点处有套管和无套管情况下的幅度比 $|B_c|/|B_n|$ 和相位差。图 3 给出了频率为 200 Hz 时 3 个主分量的响应。

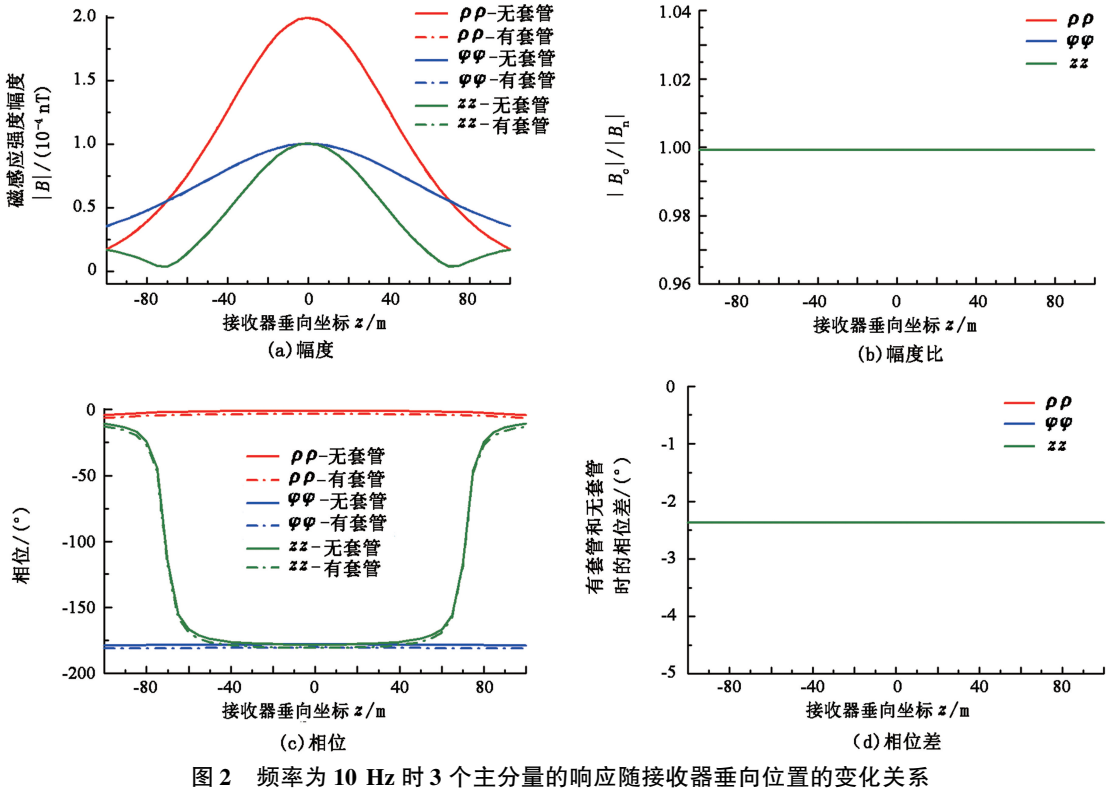

图 2　频率为 10 Hz 时 3 个主分量的响应随接收器垂向位置的变化关系

Fig. 2　Relationship between responses of three main components and receiver's vertical position when the frequency is 10 Hz

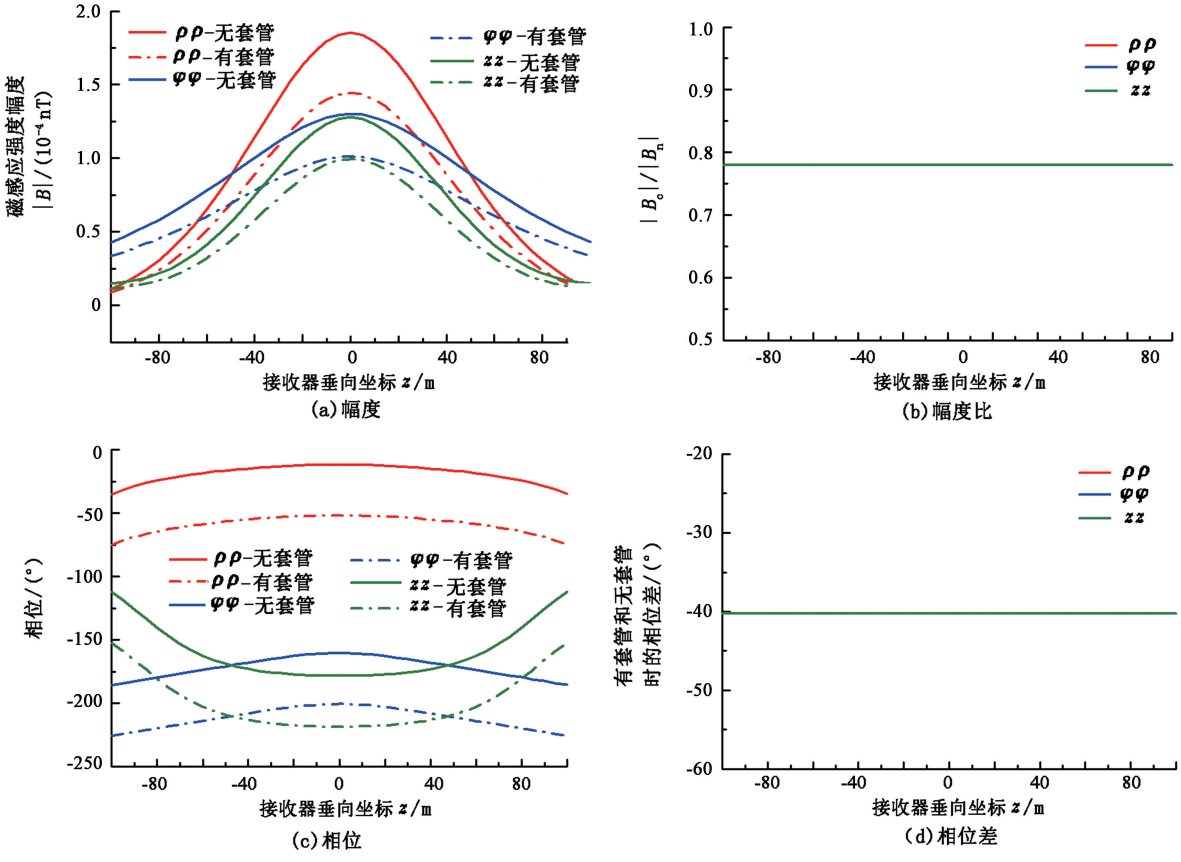

图 3　频率为 200 Hz 时 3 个主分量的响应随接收器垂向位置的变化关系

Fig. 3　Relationship between responses of three main components and receiver's vertical position when the frequency is 200 Hz

由图 2 可以看出,由于发射频率较低,金属套管导致的各分量的幅度衰减和相位落后均非常小,计算得到的金属套管导致的幅度衰减量为 0.08%(发射源发出的电磁波经套管后其幅度变为原来的 99.92%)、相位落后值为-2.37°,且该值对所有 3 个主分量都是相同的。对比图 3 和图 2 可以看出,由于发射频率升高,金属套管导致的各分量的幅度衰减和相位落后均明显增加,金属套管导致的幅度衰减量为 22.05%、相位落后值为-40.25°,发射源发出的电磁波经套管后其幅度变为原来的 77.95%,且该值对所有 3 个主分量也都是相同的。由图 2 和图 3 的计算结果可以得出如下结论:在给定频率和套管参数后,金属套管导致的磁场的幅度衰减和相位落后均为恒定值,该值与接收器的垂向位置无关、对所有分量相同。根据互易原理,金属套管导致的磁场的幅度衰减和相位落后与套管井中发射源的垂向位置也无关。

2.2　改变接收器径向位置时的响应

套管外均质各向异性地层的电导率同上,固定发射源和接收器的垂向坐标分别为 0 和-1.0 m,接收器沿径向的位置即井间距可连续变化。图 4 给出了频率为 10 Hz 时有套管和无套管情况下磁感应强度 3 个主分量的幅度和相位随接收器径向位置的变化关系,并给出了相同接收点处有套管和无套管情况下的幅度比和相位差。图 5 给出了频率为 200 Hz 时 3 个主分量的响应曲线。

由图 4 可知,除金属套管附近(3 m 以内)*zz* 分量的幅度比和相位差出现畸变外,可以得到与图 2 完全相同的结论,且金属套管导致的所有分量的幅度衰减程度和相位落后值都与图 2 所得到的数值相同。对比图 5 和图 4 可以看出,由于频率升高,金属套管附近 *zz* 分量的幅度比和相位差出现的畸变更加明显。但由图 5 其余数据得到的结论与图 3 完全相同,且金属套管导致的所有分量的幅度衰减程度和相位落后值都与图 3 得到的数值相同。由于一般情况下井间电磁测量的井间距远大于 3 m,上述针对 *zz* 分量出现的畸变不会在井间电磁测量中出现,因此根据模拟结果可以得出如下结论:在井间电磁测量中给定频率和套管参数,

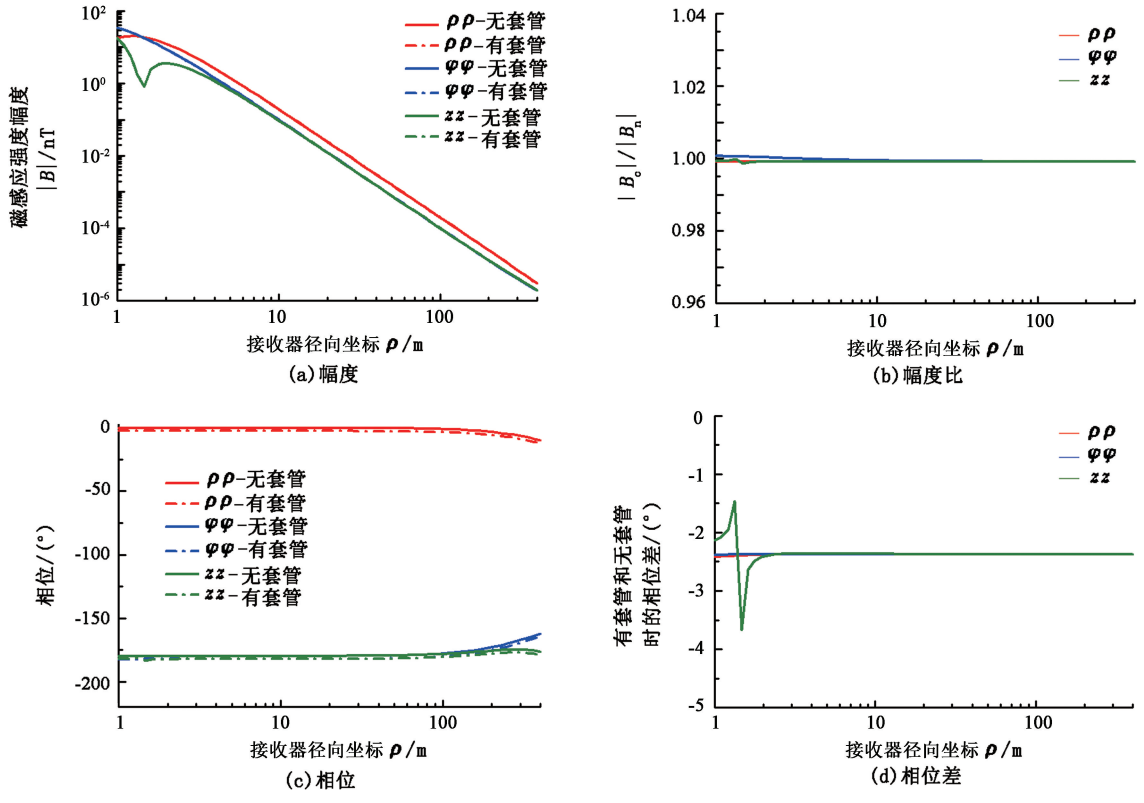

图 4　频率为 10 Hz 时 3 个主分量的响应随接收器径向位置的变化关系

Fig. 4　Relationship between responses of three main components and receiver's radial position when the frequency is 10 Hz

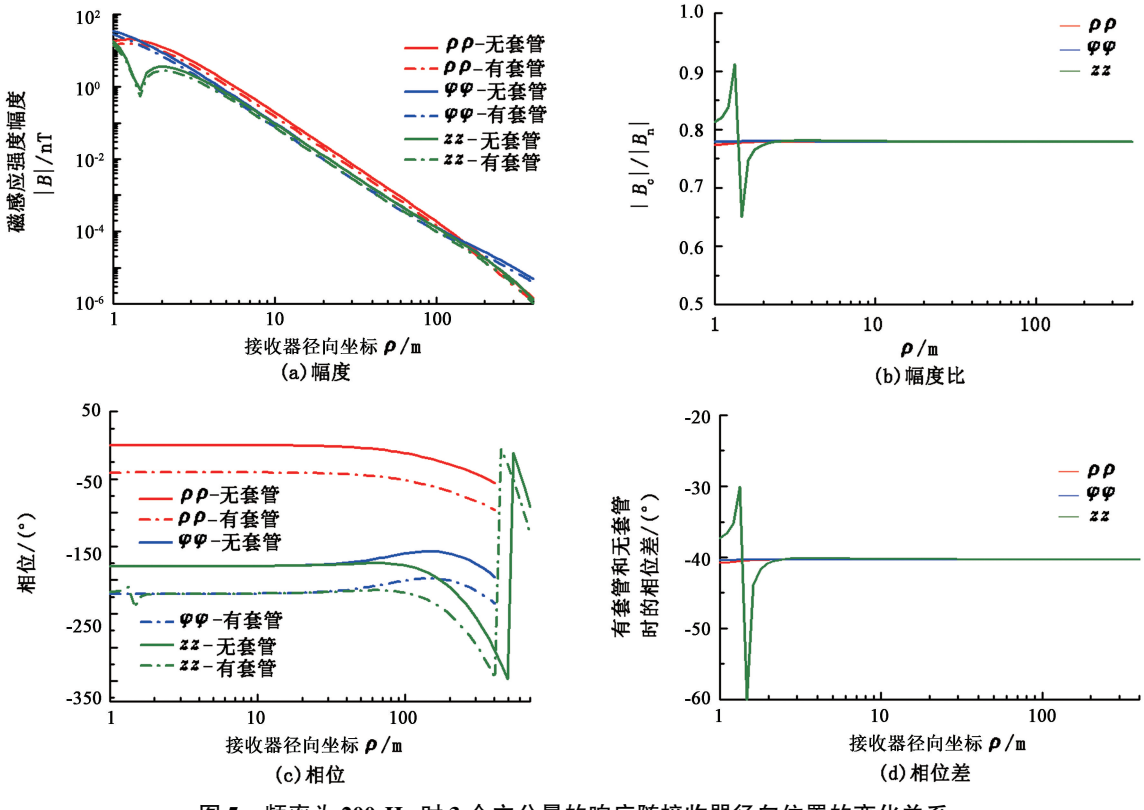

图 5　频率为 200 Hz 时 3 个主分量的响应随接收器径向位置的变化关系

Fig. 5　Relationship between responses of three main components and receiver's radial position when the frequency is 200 Hz

金属套管导致的磁场的幅度衰减和相位落后与接收器的径向位置无关,对所有分量相同。*zz* 分量的幅度比和相位差之所以在套管附近出现畸变,从计算结果看主要是由于在套管附近某一径向位置两侧磁场 *zz* 分量的符号出现改变,从而在该径向位置出现该分量磁场为 0 的现象,从物理机制分析则是由于静电增强效应的影响,文献[6]和[7]对此现象给出了解释。

2.3　改变地层电导率时的响应

固定井间距为 100 m,固定发射源和接收器的垂向坐标分别为 0 和-1.0 m,保持套管外均质各向异性地层的水平电导率与垂直电导率之比为 5 不变,地层的水平电导率和垂直电导率值可连续改变。图 6 给出了频率为 10 Hz 时有套管和无套管情况下磁感应强度 3 个主分量的幅度和相位随地层水平电导率的变化关系,并给出了相同接收点处有套管和无套管情况下的幅度比和相位差。图 7 给出了频率为 200 Hz 时 3 个主分量的响应曲线。

由图 6(b)、(d)可以得到与图 2 完全相同的结论,且金属套管导致的所有分量的幅度衰减程度和相位落后值都与前述数值相同。由图 7(d),各分量有套管和无套管情况下的相位差在某些电导率值处存在 360°的突变,在经过修正(即将有突变的信号减去 360°)后得到图 7(e)的结果。由于相位差出现 360°的变化本质上相当于不变,因而由图 7(b)、(e)可以得到与图 3 完全相同的结论,且金属套管导致的所有分量的幅度衰减程度和相位落后值都与图 3 给出的数值相同。由此可以得出如下结论:在井间电磁测量中给定频率和套管参数,金属套管导致的幅度衰减和相位落后与地层电导率无关,对所有分量相同。

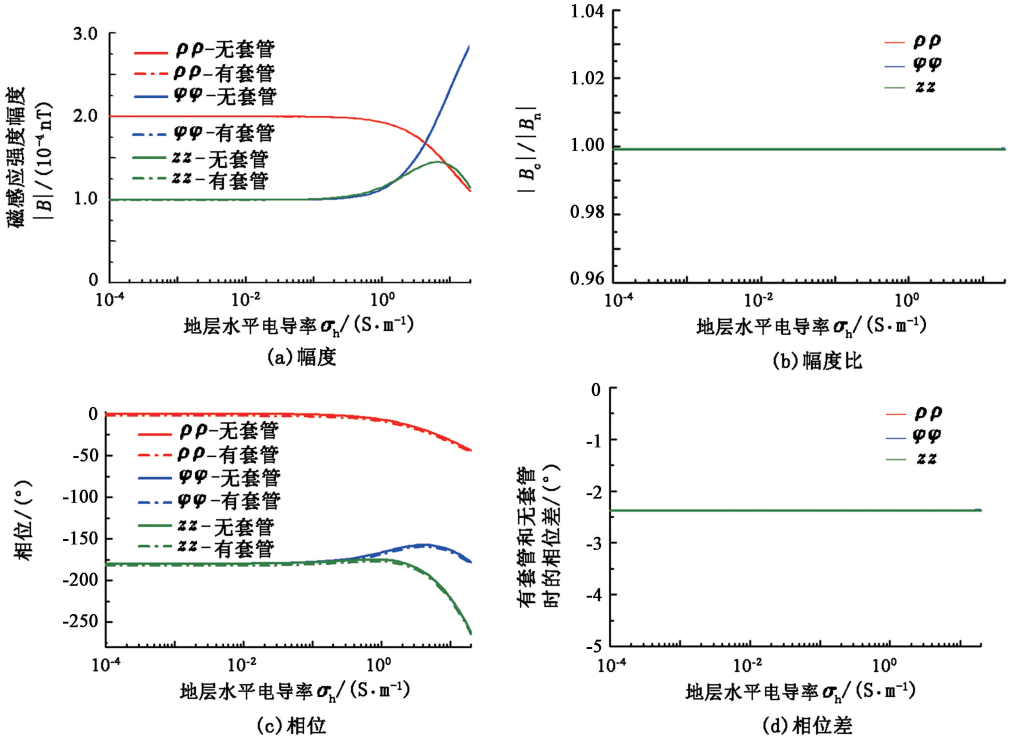

图 6　频率为 10 Hz 时 3 个主分量的响应随地层水平电导率的变化关系

Fig. 6　Relationship between responses of three main components and formation's horizontal conductivity when the frequency is 10 Hz

综合上述各种情况可以看出,在固定金属套管的半径、厚度、电导率、磁导率和发射频率的情况下,金属套管对井间电磁所有分量的响应产生的幅度衰减是恒定的、相同的,对所有分量的响应产生的相位落后亦是恒定的、相同的,与线圈系位置和地层电参数无关。在套管参数相同的前提下,当频率较低(10 Hz)时,金属套管产生的幅度衰减和相位延迟数值较小;当频率升高(200 Hz)后,有金属套管和无金属套管情况下磁场的幅度和相位均差别明显,有金属套管时磁场幅度明显降低,相位明显落后。

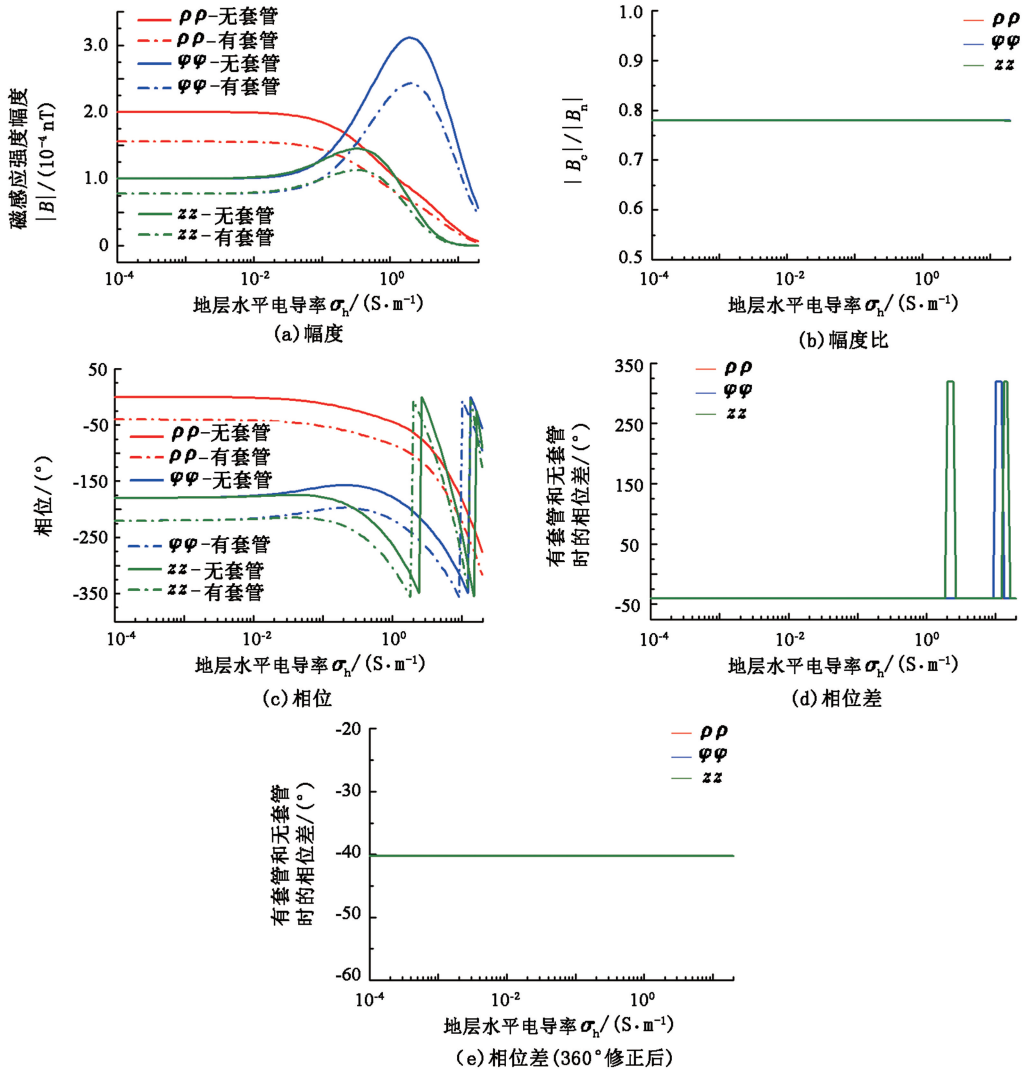

图 7　频率为 200 Hz 时 3 个主分量的响应随地层水平电导率的变化关系

Fig. 7　Relationship between responses of three main components and formation's horizontal conductivity when the frequency is 200 Hz

3　套管参数改变时井间电磁场主分量的响应

当改变金属套管的参数时,金属套管导致的幅度衰减和相位延迟数值将会发生改变。设套管内半径为 10 cm、厚度为 1 cm,取发射频率为 200 Hz、套管内钻井液电导率为 0.1 S/m、套管外均质各向异性地层的垂直电导率和水平电导率分别为 0.02 和 0.1 S/m,固定发射源和接收器的垂向坐标分别为 0 和-1.0 m、井间距为 100 m。分别取套管的相对磁导率 μ_r 为 1、50、100 和 200,套管的电导率可连续改变。图 8 ~ 10 分别给出了套管电导率连续变化时接收器处 $\rho\rho$、$\varphi\varphi$、zz 3 个磁感应强度主分量的幅度和相位。

由这些图可以看出,当套管电导率较小时,各分量的幅度和相位均无明显变化,套管的影响可忽略不计。随着电导率的增加,当达到某一临界值时,接收信号的幅度开始快速衰减、相位快速改变。套管的相对磁导率 μ_r 越大,接收信号的幅度开始快速衰减、相位开始快速落后时对应的套管电导率越小。在套管电导率较大的区域,相位随套管电导率的增加急剧震荡,说明相位延迟程度剧烈。表 1 给出了所选取的几组不同套管参数值对应的接收信号 zz 分量的幅度衰减和相位延迟值(根据前面讨论,其他分量对应的数值与 zz 分量相同)。通过分析表 1 以及其他相关计算结果可以看出,套管的厚度越大、套管的相对磁导率和电导率越大,所采用的发射频率越高,则套管所导致的幅度衰减和相位延迟越明显。

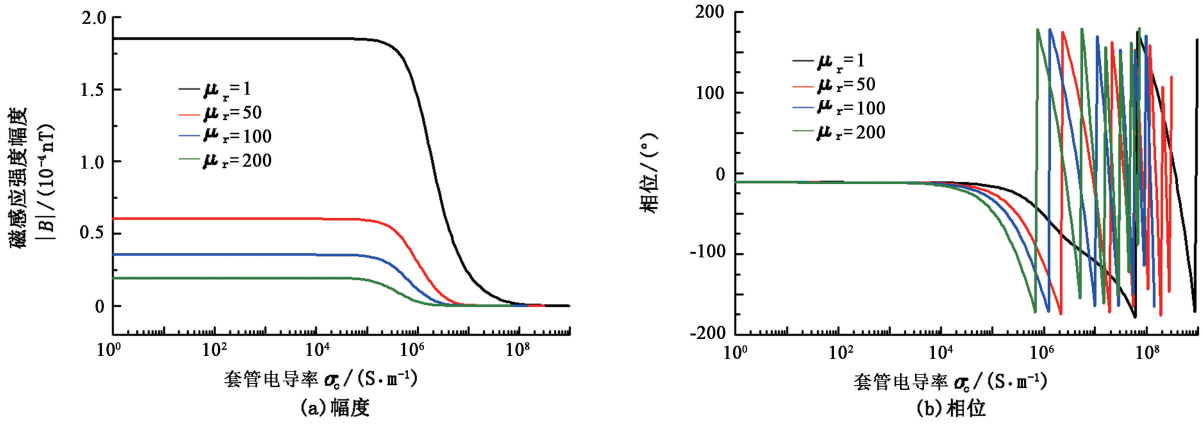

图 8　$\rho\rho$ 分量的响应随套管电导率的变化关系

Fig. 8　Relationship between responses of $\rho\rho$ component and casing's conductivity

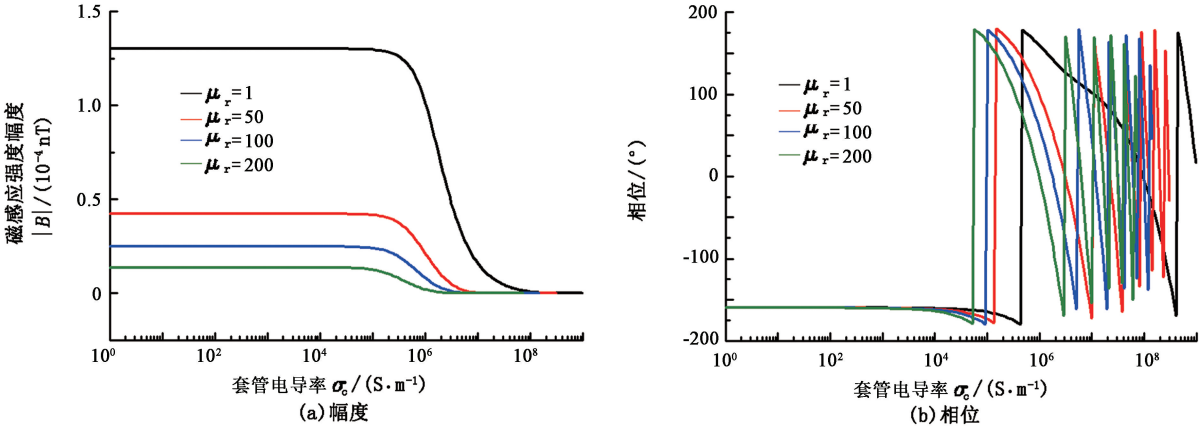

图 9　$\varphi\varphi$ 分量的响应随套管电导率的变化关系

Fig. 9　Relationship between responses of $\varphi\varphi$ component and casing's conductivity

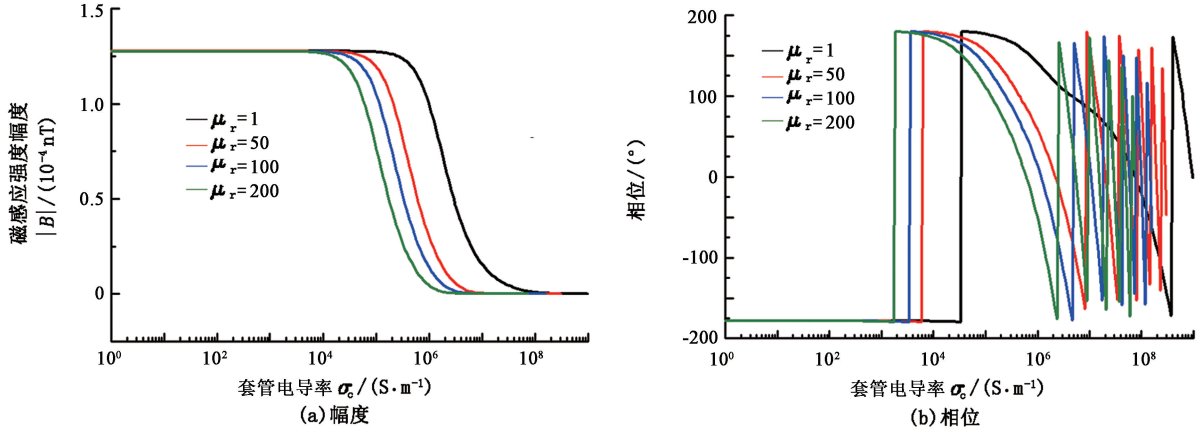

图 10　zz 分量的响应随套管电导率的变化关系

Fig. 10　Relationship between responses of zz component and casing's conductivity

根据前面分析,上述计算结果同样适用于接收井中具有相同参数的套管。例如,假设某一发射井金属套管参数在 200 Hz 频率下导致的幅度衰减量为 22.05%、相位延迟量为-40.25°,则接收井中具有相同参数的金属套管导致的幅度衰减量亦为 22.05%、相位延迟量亦为-40.25°。若在实际井间电磁测量中发射井和接收井中同时含有金属套管,则可以根据套管参数和发射频率分别计算出发射井和接收井中单独含有金属套管时导致的幅度衰减量和相位延迟量,然后进行组合即可。例如,假设发射

井金属套管导致的幅度衰减量为 22.05%、相位延迟量为-40.25°,接收井金属套管导致的幅度衰减量为 32.63%、相位延迟量为-61.62°,则经过这两层套管后电磁信号的幅度变为原来的(1-22.05%)×(1-32.63%)=0.525 1 倍,相位延迟为-40.25°-61.62°=-101.87°。

表 1　不同套管参数对应的接收信号的幅度衰减和相位延迟值

Table 1　Value of receiver signal's amplitude attenuation and phase delay for different parameters of casing

套管内半径/cm	套管厚度/cm	套管相对磁导率	套管电导率/(10^5 S·m^{-1})	频率/Hz	幅度衰减量/%	相位延迟/(°)
10	1	1	10.0	10	0.08	-2.37
10	1	1	10.0	200	22.05	-40.25
10	1	50	10.0	200	76.53	-123.53
10	1	50	2.9	200	32.63	-61.62
10	1	100	10.0	200	89.17	-167.96
10	1	100	2.9	200	56.09	-89.98
10	1	200	10.0	200	96.47	-232.99
10	1	200	2.9	200	76.82	-125.72
10	2	1	10.0	10	0.33	-4.97
10	2	1	10.0	200	47.96	-64.31
10	2	50	10.0	200	96.64	-236.43
10	2	50	2.9	200	77.18	-127.49
10	2	100	10.0	200	99.31	-328.54
10	2	100	2.9	200	90.30	-176.54
10	2	200	10.0	200	99.93	-460.19
10	2	200	2.9	200	97.15	-247.48

在实际井间电磁测量中,经常出现发射井、接收井单井或两井同时含有金属套管的情况,这就要求在对测量数据进行解释处理时需要事先消除掉套管的影响。若已知井下套管参数,则可采用本文计算方法将含金属套管的信号幅度除以相应的倍数(如根据前面发射井和接收井中同时含有金属套管情况的数值算例,无套管时的幅度应为有金属套管时的幅度除以 0.525 1)、将其相位加上相应的数值(如该算例中无套管时的相位应为有金属套管时的相位加上 101.87°)即可消除套管的影响,从而将有金属套管时的测量值转化为无套管情况下的数值。

根据上述计算结果,在套管参数一定的情况下,所采用频率越低,金属套管产生的幅度衰减和相位延迟数值越小,金属套管的影响也就越小。因此在井下含有金属套管的情况下进行井间电磁测量时为了保证信号的强度,应在分辨率允许的频率范围内尽量采用较低的发射频率,从而在兼顾到信号分辨率的前提下尽量减少金属套管造成的信号强度的衰减。

4　结　论

(1) 在固定金属套管参数和发射频率的情况下,金属套管对井间电磁所有分量响应的影响是恒定的、相同的。只要套管参数和频率固定,则金属套管导致的所有分量的幅度衰减和相位延迟均为定值,与线圈系位置和地层电参数无关。

(2) 相同频率情况下,套管的磁导率越大,接收信号的幅度开始迅速衰减时对应的套管电导率越小,接收信号的相位开始迅速落后时对应的套管电导率越小且落后越快。在套管电导率极大的区域,相位随套管电导率的变化急剧震荡,说明相位延迟程度剧烈。

(3) 套管的厚度越大、套管的相对磁导率和电导率值越大,发射频率越高,套管导致的幅度衰减和相位延迟越明显。在已知井下套管参数时可将含金属套管的信号的幅度除以相应的倍数,并将其相位加上相应的数值即可消除金属套管的影响,从而将有金属套管时的测量值转化为无套管情况下的数值,并利用转化后的数据进行解释处理。

参考文献:

[1] BEER R, ZHANG P, ALUMBAUGH D L, et al. Anisotropy modeling and inversions of DeepLook-EM data from Brazil [C/CD]. 2010 SEG Annual International Meeting, October 17-22, 2010, Denver, Colorado, USA.

[2] ALUMBAUGH D L, MORRISON H F. Theoretical and practical considerations for cross-well electromagnetic tomography assuming a cylindrical geometry [J]. Geophysics, 1995,60(3):846-870.

[3] LIU C, SHEN L C, ZHANG Y C. Monitoring saltwater injection using conductivity images obtained by electromagnetic cross-hole measurements [J]. Radio Science, 1995,30(5):1405-1415.

[4] ZHANG Y C, LIU C, SHEN L C. An iterative algorithm for conductivity image reconstruction from crosswell EM measurements [J]. Geophysics, 1996, 61(4): 987-997.

[5] 魏宝君. 井间电磁场的一维、二维联合反演方法[J]. 地球物理学报, 2006,49(1):264-274.
WEI Baojun. A combined 1-D/2-D inversion algorithm of cross-hole electromagnetic fields [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006,49(1):264-274.

[6] AUGUSTIN A M, KENNEDY W D, MORRISON H F, et al. A theoretical study of surface-to-borehole electromagnetic logging in cased holes[J]. Geophysics, 1989,54

(1):90-99.

[7] UCHIDA T, LEE K H, WILT M J. Effect of a steel casings on crosshole EM measurements [C/CD]. 1991 SEG Annual International Meeting, Expanded Abstracts: 442-445, November 10-14, 1991, Houston, Texas, USA.

[8] KAUFMAN A A, WIGHTMAN W E. A transmission-line model for electrical logging through casing[J]. Geophysics, 1993,58(12):1739-1747.

[9] XU W, HABASHY T M. Influence of steel casings on electromagnitic signals[J]. Geophysics, 1994,59(3): 378-390.

[10] NEKUT A G. Crosswell electromagnetic tomography in steel-cased wells[J]. Geophysics, 1995,60(3):912-920.

[11] 栗建军,孟凡顺,孟恩. 金属套管对井间电磁测井的影响[J]. 石油物探,2003,42(2):256-260.
LI Jianjun, MENG Fanshun, MENG En. Efects of casing on crosswell electromagnetic logging[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003,42(2):256-260.

[12] 宋汐瑾,党瑞荣,董昭. 套管井电磁测井技术及套管影响规律研究[J]. 测井技术,2010,34(2):143-145.
SONG Xijin, DANG Ruirong, DONG Zhao. On electromagnetic logging technology in cased hole and its casing influence[J]. Well Logging Technology, 2010,34(2): 143-145.

[13] 陆洪,刘菊,陈林如. 井筒套管对井间电磁成像测井信号传输的影响[J]. 电波科学学报,2012,27(4): 754-759.
LU Hong, LIU Ju, CHEN Linru. Influence of wellbore casing on crosswell electromagnetic tomography signal [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2012,27(4): 754-759.

[14] 吴瑶,毛剑琳,唐俊,等. 套管对井间电磁测井的影响规律研究[J]. 西北大学学报(自然科学版),2014,44(1):17-22.
WU Yao, MAO Jianlin, TANG Jun, et al. Efects of casing on cross-hole electromagnetic logging[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2014,44(1):17-22.

[15] 魏宝君,陈涛,侯学理,等. 利用径向成层介质的 Green 函数和积分方程模拟含金属套管井间电磁场的响应[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2014, 38(1):57-63.
WEI Baojun, CHEN Tao, HOU Xueli, et al. Simulating cross-hole electromagnetic field's response with metal casing using Green's functions of radial-layered medium and integral equations [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2014,38(1):57-63.

[16] 魏宝君,王成园,党峰,等. 用柱状成层各向异性介质的并矢 Green 函数模拟多分量感应测井仪器的响应[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2016,40(2): 59-69.
WEI Baojun, WANG Chengyuan, DANG Feng, et al. Simulating responses of multi-component induction logging tools by dyadic Green's functions in cylindrically stratified anisotropic media[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(2):59-69.

[17] 魏宝君,王成园,常欣莉,等. 柱状成层地层中仪器偏心对阵列感应测井响应的影响[J]. 地球物理学报, 2016,59(8):3121-3132.
WEI Baojun, WANG Chengyuan, CHANG Xinli, et al. Effect of tool eccentricity on responses of array induction logging tools in cylindrical multilayered formations[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2016,59(8):3121-3132.

[18] 魏宝君,曹景强,任广强,等. 用柱状成层各向异性介质的并矢 Green 函数模拟偏心对多分量感应测井响应的影响[J]. 地球物理学报,2017,60(3):1234-1247.
WEI Baojun, CAO Jingqiang, REN Guangqiang, et al. Simulating effect of tool eccentricity on responses of multi-component induction logging tools by dyadic Green's functions in cylindrically stratified anisotropic media [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,60(3): 1234-1247.

[19] CHEW W C. Waves and fields in inhomogeneous media [M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990.

(编辑 修荣荣)